

実測風速を組み込んだ風力発電設備支持物の風応答予測

RESPONSE ANALYSIS OF WIND TURBINE SUPPORT STRUCTURES USING MEASURED WIND SPEED

石原 孟¹⁾

ファム バン フック²⁾

山口 敦³⁾

Takeshi ISHIHARA¹⁾, Pham Van Phuc²⁾ and Atsushi YAMAGUCHI³⁾

ABSTRACT

In this study, a method for the estimation of the response of wind turbine support structures is proposed by using measured wind speed. Following results were obtained. By introducing a new model for turbulence intensity, the prediction accuracy of the wind response of the wind turbine support structures at low wind speed increased. A method to combine the measured wind speed with the wind speed generation was proposed and applied for the estimation of response of the wind turbine support structures. The results show that when measured wind speed is used, better agreement with the measurement is observed.

Key Words: Response of Wind Turbine Support Structure, Measured Wind Speed, Health Monitoring of Wind Turbine, Wind Generation, Turbulence Intensity

1. はじめに

近年、再生可能エネルギーの導入促進により風力発電設備が急速に増えている。我が国の風力発電の設備容量は平成20年3月には149万kWに達し、1314基を超える風車が全国各地に建設され、国内における風力発電産業も形成されつつある。一方、風力発電設備の故障・事故も多く報告され、風車の耐風安全性の向上が緊急の課題となっている¹⁾。風力発電設備は制御不能な自然風に常時さらされるという過酷な条件下で運転する機械であり、故障・事故の原因を特定するため、あるいは設備の寿命を精度よく評価するためにはモニタリングによる常時の荷重の推定が不可欠である。

風力発電設備の安全性に関して、石原ら²⁾は運転停止状態にある400kW風車を対象とした現地観測を実施し、支持構造物の固有振動数および構造減衰を推定するとともに、風応答解析プログラムを開発し、タワー基部のモーメントを実測と比較することにより、プログラムの検証を行った。また、山本ら³⁾は600kWコンクリート製タワーの実測によりタワー基部における転倒モーメントを実測し、風車の応答特性を明らかにした。

従来の研究では乱流統計量を仮定し、暴風時の風荷重を推定している。常時の荷重を求める上では低風速時の乱流強度のモデル化が重要となるが、耐風工学では強風を対象としてきたため、乱流強度は風速には依存せず、一定と仮定している⁴⁾。しかし、実際には乱れ強度は風速の関数であり、低風速時ほど値が大きくなることが知られているため、従来のモデルでは低風速時の荷重を過少評価する恐れがある。また、従来、荷重推定のためには乱れのスペクトル、空間相関などの統計量を考慮して人工的な擬似風速データを発生させ、動解析によって荷重の推定を行っていたが、常時の風荷重を求める際には、風力発電設備においてモニ

1),3) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授, 助教

2) 清水建設株式会社技術研究所

タリングされる風速データを用いることにより，信頼性の高い風荷重を求めることができると期待される．そのためには，乱れのスペクトル，空間相関などとともに，風観測データを同時に考慮して模擬自然風を発生させる手法が必要となる．岩谷⁵⁾は流れ方向のみの1成分の風をスペクトル，空間相関を考慮して時間空間で発生させ，複数点の観測データを組み込む手法を提案したが，応答への影響を定量的に評価していない．さらに，風力発電設備は風直角方向に大きな空気力を発生させるブレードを持つため，支持物の応答を解析する上では風速の流れ方向成分のみならず，流れ直角方向成分および鉛直成分を考慮することが必要である．

本研究では，これらの問題点を解決するため，低風速時の乱れ強度を適切に評価する手法を提案するとともに，風観測データを用いてより現実に近い風荷重を推定する手法を考案する．まず，乱れ強度を平均風速の関数としてモデル化し，外力である自然風を発生させ，風力発電設備の動解析を実施し，風車の応答および風車タワー基部におけるモーメントをシミュレーションし，従来の乱れ強度を一定とした場合のモデルによる解析結果と比較し，低風速時の応答の過少評価の問題を解決する．次に，岩谷により提案された模擬変動風速の作成方法を改良し，3成分を持つ変動模擬風を作成する手法を提案するとともに，観測データを用いる場合と用いない場合を比較し，風応答への影響を定量的に評価する．

2. モデルの概要

本節では風力発電設備支持物に作用する風荷重を解析するための数値モデルについて説明する．

2.1 有限要素モデル

風応答解析には，筆者らによって開発された多質点風応答解析プログラム CAsT²⁾を使用した．プログラムの概要を表1に示す．風車の振動を記述する運動方程式は次式のようにになる．

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{f} \quad (1)$$

ここで， $\mathbf{M}$ は質量マトリックス， $\mathbf{C}$ は減衰マトリックス， $\mathbf{K}$ は要素剛性マトリックス， $\mathbf{f}$ は各節点における空気力ベクトル， $\mathbf{x}$ は節点の変位ベクトルである．空気力は各要素に作用する空気力を準定常理論により求めた後，各節点における空気力に変換した．風車ロータ，ナセル，タワーの各要素に作用する空気力 $\mathbf{f}$ は準定常理論により次式により揚力成分と抗力成分をそれぞれ求めた後に座標変換によって風車全体座標の成分に変換し，各節点における荷重に変換した．

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A C_D(\alpha) (|\mathbf{u} - \dot{\mathbf{x}}|)^2, \quad F_L = \frac{1}{2} \rho A C_L(\alpha) (|\mathbf{u} - \dot{\mathbf{x}}|)^2 \quad (2)$$

ここで， F_D は抗力， F_L は揚力， ρ は空気の密度， A は代表面積， $C_D(\alpha)$ と $C_L(\alpha)$ は迎角 α における抗力係数，揚力係数である⁸⁻¹¹⁾． $\mathbf{u}$ は風速ベクトル， $\dot{\mathbf{x}}$ は節点の移動速度ベクトルである．なお，ブレードに作用するねじりモーメントは小さいと考え，無視した．抗力は要素の移動速度の関数であることから，空力減衰が発生することが分かる．

表1 多質点風応答解析プログラム CAsT の概要

数値積分	Newmark- β 法
固有値解析	Subspace Iteration 法
使用要素	Saint-Venant のねじりを考慮する 6 自由度のビーム要素
参照座標系	Total Lagrange 定式化
空気力の評価	準定常理論
構造減衰	Rayleigh 減衰

2.2 変動風の発生手法

本研究では岩谷により提案された手法⁵⁾を3成分の風に拡張し，風車の各点における3成分の変動風速を発生させた．岩谷の手法では風速を過去の風速の時系列の線形和(AR モデル)とランダム成分との和で(3)式

により表すことができると仮定する.

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{m=1}^M \mathbf{A}(m) \mathbf{u}(t - m\Delta t) + \mathbf{n}(t), \quad \mathbf{u}(t) = {}^t(u_1(t) \ u_2(t) \ \cdots \ u_K(t)), \quad \mathbf{n}(t) = {}^t(\varepsilon_1(t) \ \varepsilon_2(t) \ \cdots \ \varepsilon_K(t)) \quad (3)$$

ここで, M は AR モデルで用いる過去のデータ数, K は風速を発生させる地点数, m は時間のインデックス, Δt はデータの時間間隔を示す. また, $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{n}(t)$ は対象点での変動風速値およびそのランダム成分をベクトルで表したものの時系列であり, 上式で表される. ここで $u_k(t)$ および $\varepsilon_k(t)$ はそれぞれ地点 k , 時刻 t における風速およびそのランダム成分を示す. 岩谷の手法ではこのモデルに基づき, 風速の自己相関および相互相関から行列 $\mathbf{A}(m)$ を求め, 空間的な相関を満足するように $\mathbf{n}(t)$ を求める. まず, $\mathbf{A}(m)$ を求めることを考える. 式(3)は K 本の連立方程式となるが, 各式の両辺に $\mathbf{u}(t - r\Delta t)$ (ただし, $r = 1, 2, \dots, M$) を乗じると, $K \times M$ 本の関係式を作ることができる. この $K \times M$ 本の関係式を行列の形で表すと,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}(1) & \mathbf{R}(2) & \cdots & \mathbf{R}(M) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(1) & \mathbf{A}(2) & \cdots & \mathbf{A}(M) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{R}(0) & \mathbf{R}(1) & \cdots & \mathbf{R}(M-1) \\ \mathbf{R}(-1) & \mathbf{R}(0) & \cdots & \mathbf{R}(M-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{R}(1-M) & \mathbf{R}(2-M) & \cdots & \mathbf{R}(0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる. ただし, $\mathbf{R}(r)$ の成分 $R_{ij}(r)$ は風速の i 成分と, 風速の j 成分の時間差 r を考慮した相関を表わし, 式(5)で定義される.

$$R_{ij}(r) = \overline{u_i(t - m\Delta t) \times u_j(t - (m+r)\Delta t)} \quad (5)$$

この手法は定常過程を仮定しているため, $R_{ij}(r)$ は m に依存せず, 乱流の統計的性質より決定することが可能である. 例えば $i = j$ の場合, $R_{ij}(r)$ は地点 i における風速の自己相関を表わし, パワースペクトル密度のフーリエ逆変換により求めることが可能である. また, $i \neq j$ の場合は地点 i と地点 j の間の相互相関であり, クロススペクトル密度のフーリエ逆変換により求めることができる. また, クロススペクトル密度は変動風速の空間相関であるコヒーレンス, 位相および両点でのパワースペクトル密度から求めることができる. 式(5)においては, 方程式の数は $K \times K \times M$ であり, 未知数である $\mathbf{A}(r)$ の要素数も $K \times K \times M$ であるため, 式(4)を解くことによって $\mathbf{A}(r)$ の各成分, すなわち式(3)における多次元自己回帰の係数行列を求めることができる.

最後に, 式(3)中のランダム成分 $\mathbf{n}(t)$ を発生させる手法について説明する. 式(3)中の AR モデル部分は前段で説明した手法により, 空間相関および時間相関を満足する量となっている. また, ランダム成分は時間相関のない量であるため, 式(3)によって得られた変動風速の時系列の空間相関を満たすようにランダム成分を決定すれば, 式(3)により求めた変動風速の時系列は時間相関および空間相関を満足するものとなる. ランダム成分の空間相関 $\overline{\varepsilon_i \varepsilon_j}$ を成分とする行列 $\mathbf{D}$ は次式により求めることができる. また, このような空間相関を満たすランダム成分の組み $\mathbf{n}(t)$ は互いに無相関な分散 1, 平均値 0 の白色雑音を要素とするデータの組み $\mathbf{o}(t)$ を用いて次式により求めることが可能である. ここで $\mathbf{L}$ は下式を満たす下三角行列である.

$$\mathbf{D} = \mathbf{R}(0) - \sum_{m=1}^M \mathbf{A}(m) {}^t \mathbf{R}(m), \quad \mathbf{n}(t) = \mathbf{L} \cdot \mathbf{o}(t), \quad \mathbf{D} = \mathbf{L} \cdot {}^t \mathbf{L} \quad (6)$$

以上, 岩谷の方法による風速の時系列の発生手法を述べてきたが, 本研究では 3 成分の風を発生できるようにこの手法を拡張した. その際, 式(3)は

$$\mathbf{u}^p(t) = \sum_{q=1}^3 \left[\sum_{m=1}^M \mathbf{A}^{pq}(m) \mathbf{u}^q(t - m\Delta t) \right] + \mathbf{n}^p(t) \quad (7)$$

と書くことができる. ここで, $\mathbf{u}^p(t)$ の右肩の p は風速の成分を示し, $p = 1, 2, 3$ がそれぞれ流れ方向, 流れ直角方向, 鉛直方向の成分に対応する. 本研究ではこの式に基づき, 岩谷の方法と同様に変動風速を発生させた. なお, この手法により 3 成分の風を発生させるためには, 異なる風速成分間の相関をモデル化する必要

があるが、本研究では、異なる変動風速成分間の相関は全て 0 と仮定し、次式を用いる。

$$\overline{u^p(t - m\Delta t) \times u^q(t - (m + r)\Delta t)} = 0 \quad (p \neq q) \quad (8)$$

なお、風方向と鉛直方向の風速成分の相関は一般に 0 ではないので、その影響について今後調べたい。

2.3 風観測データを用いた変動風速の発生手法

前節では、モデル化された風速および乱流の特性に基づき人工的な変動風速を発生させ、風車の応答をシミュレーションする手法について説明したが、風力発電設備には通常風速計が設置されており、瞬間風速が測定されている。風観測データを束縛条件として人工変動風速を発生させることができれば、得られた応答の乱数による不確実性が小さくなり、より信頼性の高い応答が予測可能であると予想される。そこで本研究では風観測データを組み込んで変動風を発生させ、その影響を明らかにした。

岩谷によって提案された風観測データを変動風の発生に用いる手法⁶⁾でも同様に式(3)を仮定し、行列 $\mathbf{A}(m)$ を求める。また、ランダム成分の相関行列 $\mathbf{D}$ も同様に求める。今、 K 個の点のうち、 $k = 1, \dots, l$ において観測データが得られており、 $k = l+1, \dots, K$ において観測データが得られていないと仮定する。式(6)を成分の形で書き下すと

$$\begin{pmatrix} n_1(t) \\ \vdots \\ n_l(t) \\ n_{l+1}(t) \\ \vdots \\ n_K(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{11} & & & & & \\ \vdots & \ddots & & & & \\ & & & & 0 & \\ L_{l1} & \cdots & L_{ll} & & & \\ \hline L_{l+11} & \cdots & L_{l+1l} & L_{l+1l+1} & & \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ L_{K1} & \cdots & L_{Kl} & L_{Kl+1} & \cdots & L_{KK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} o_1(t) \\ \vdots \\ o_l(t) \\ o_{l+1}(t) \\ \vdots \\ o_K(t) \end{pmatrix} \quad (9)$$

となる。観測データが得られている点 $k = 1, \dots, l$ においては風速の時系列が既知なので、ランダム成分 $n_1(t)$, $\dots$, $n_l(t)$ も既知となる。従って、式(9)の上半分(点線より上の部分)から $o_1(t)$, $\dots$, $o_l(t)$ を求めることができる。次に、式(9)の下半分すなわち

$$\begin{aligned} n_{l+1}(t) &= L_{l+11}o_1(t) + \cdots + L_{l+1l}o_l(t) + L_{l+1l+1}o_{l+1}(t) \\ &\vdots \\ n_K(t) &= L_{K1}o_1(t) + \cdots + L_{Kl}o_l(t) + L_{Kl+1}o_{l+1}(t) + \cdots + L_{KK}o_K(t) \end{aligned} \quad (10)$$

により $n_{l+1}(t)$, $\dots$, $n_K(t)$ を求め、観測点以外の点における変動風速の時系列を作成することが可能である。本研究ではこの手法を前節で提案した 3 成分の自然風を発生させる手法に組み込み、風観測データを用いて 3 成分の自然風を発生させた。

3. 風力発電設備の動解析結果

本節では以上説明した手法を用いて、風力発電設備の動解析を実施し、乱流のモデル化の影響および風観測データを組み込んだ場合について議論する。

3.1 乱流のモデル化の影響

従来、風工学の分野では、乱流強度は風速には関係なく、風向および場所のみの関数であるとの仮定に基づきモデル化されてきたが、乱流強度は平均風速の関数である。図 1 は宮古島の風力発電設備で風車停止時に観測された平均風速と乱流強度の関係²⁾を示すが、低風速時に乱れ強度が大きくなっていることがわかる。本研究では低風速時における乱れ強度を適切にモデル化するため、IEC61400-1⁷⁾に規定されている乱流モデルクラス C を用いた。

なお、その他の乱流統計量として、変動風速のパワースペクトルはカルマン型を、変動風速の相関は指数コヒーレンスモデルを仮定し、ディケイファクターおよび位相はそれぞれ 8, 0 とした。また風直交方向と鉛直方向の乱れ強度 I_u および I_w は IEC61400-1 に従い風方向の乱れ強さ I_u の関数として、 $I_u = 0.8I_v$ 、 $I_w = 0.5I_u$ とした。また、長さ方向の乱流の長さスケールは建築学会指針⁴⁾に従い求めるとともに、流れ直角方向、鉛直方向の長さスケールはそれぞれ $L_v = 0.33L_u$ 、 $L_w = 0.08L_u$ とした。また、平均風速および乱れ強度の鉛直分布は建築学会指針に定める粗度区分 I の鉛直分布を採用した。

3.2 風車応答の解析結果

以上に述べたモデルおよび手法を用いて、400kW 風車の風応答を求め、観測データと比較した。解析にあたり、タワーの抗力係数については文献⁹⁾により 0.6 を採用し、ナセルの抗力係数と揚力係数は実験値⁹⁾を採用した。また、ブレードの各断面における抗力と揚力係数は翼厚比 12%¹⁰⁾と 21%¹¹⁾の翼断面の空気力係数から内挿して求めた。ナセル方向とナセルの直交方向の構造減衰については現地観測から算定された 1.0%と 0.6%を使用した。風車全体に作用する 3 成分の変動風速は前節で述べた手法に従い発生した。計算時間刻みは 0.05 秒とし、14000 ステップの解析を行い、過渡応答が含まれる初期の 2000 ステップを除いた 12000 ステップ、すなわち、10 分間の解析結果を整理し、タワー基部での曲げモーメントを求めた。風向は北風を対象とし、ハブ高さ平均風速は 5, 10, 15, 20, 25, 30m/s の 6 風速とし、各風速について異なる乱数列を用いた 6 通りのシミュレーションを実施した。なお、参考のため、従来と同様に乱れ強度が一定値(11%)とした場合の計算も実施した。

図 2 には解析により得られたタワー基部での曲げモーメントの風速別の最大値、平均値、標準偏差と観測値の比較結果を示す。(a)が x 方向(ナセル軸方向)の曲げモーメントであり、(b)が y 方向(ナセル軸直角方向)の曲げモーメントである。従来の手法に比べ、本研究で提案した手法では、各風速レベルにおける曲げモーメントの最大値および標準偏差の予測精度の改善が見られた。

3.3 風観測データを用いた応答予測

本節では 2 章で述べた手法に従い、風観測データを用いて変動風速を発生させて風車応答を求め、風観測データを用いない手法との違いを述べる。石原らによる観測期間中に平均風速 19.87m/s の強風を観測した 10 分間を対象として風車ナセルにおける風観測データを用いて 2 章で説明した手法により異なった乱数種を用いて 6 種類の自然風を発生させ、動解析によりタワー基部におけるモーメントを求めた。なお、このときの乱れ強度は 10.76%であった。

各シミュレーションにおいて求めたモーメントの

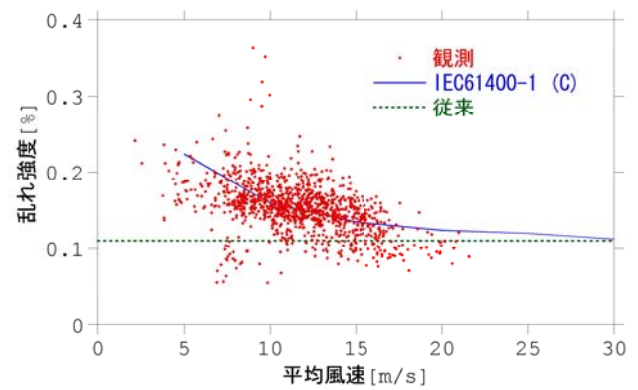


図 1 風速別の乱れ強度

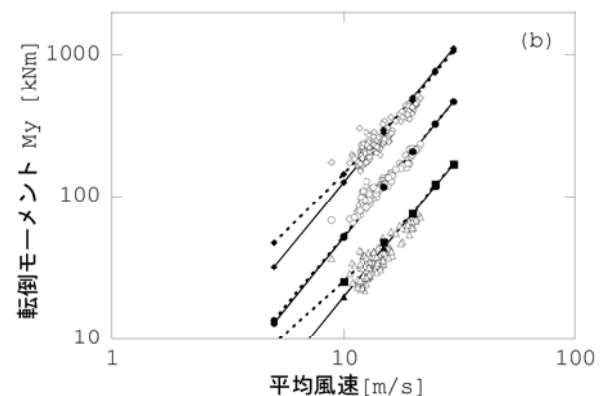
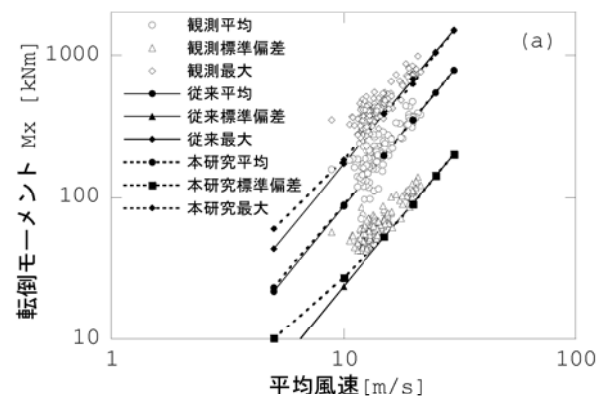


図 2 タワー基部におけるモーメント

最大値を観測値で割ったものを図3に示す。風観測データを用いない場合にはシミュレーションケースによって値が観測値と大きく異なる場合があるが、風観測データを用いた場合にはおおむね同じ値を示している。このことから、風観測データを用いた場合には、模擬変動風速は観測された風速の時系列変動に近づき、結果的に予測された風応答は現実の風応答に近づいたと考えられる。

4. まとめ

本研究では実測データを組み込むことにより有限要素モデルを用いて風力発電設備支持構造物の風応答を予測する手法を提案し、以下の結論を得た。

1. 乱れ強度を風速に応じて評価するモデルを導入することにより、風力発電設備支持物基部における低風速時の応答の予測精度が向上した。
2. 観測点において観測された変動風速の時系列を用いて3成分の人工的な変動風速を発生させる手法を開発し、風力発電設備支持物の応答への影響を定量的に評価した。その結果、観測値を用いない場合と比較して観測値を用いた場合には観測結果とよく一致することを明らかにした。

参考文献

- 1) 平成18年度風力発電利用率向上調査委員会および故障・事故等調査委員会報告書，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構，2007。
- 2) 石原孟，ファバンフック，高原景滋，銘苅壮宏：風力発電設備の風応答評価に関する研究，第19回風工学シンポジウム，pp.175-180，2006。
- 3) 山本学，内藤幸雄，近藤宏二，大熊武司：実測による風力発電タワーの風荷重特性と作用外力の推定，日本建築学会構造系論文集，第617号，pp. 39-46，2007。
- 4) 建築物荷重指針・同解説，日本建築学会，2004。
- 5) 岩谷祥美：任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元の風速変動のシミュレーション，日本風工学会誌，No.11，pp. 5-18，1982。
- 6) 岩谷祥美：実測データを組み込んだ多次元風速変動のシミュレーション，日本風工学会誌，No. 69，pp. 1-13，1996。
- 7) IEC 61400-1(2005): Wind Turbines-Part 1:Design Requirements, International Electrotechnical Commission. 3rd edition, 2005.
- 8) British Standard Institution: Code of basic data for the design of buildings, CP3, Chapter V, Part 2, Wind Loads, 1972.
- 9) Noda, H., Shimada, K., Ishihara, T.: Wind Forces and Peak Wind Pressure Distributions on Wind Turbine Nacelle, *Proc. APCWE VI*, Seoul, 2005.
- 10) Generic 2MW Offshore Turbine, GH Bladed Version3.51, Garrad Hassan and Partners Limited, 2001.
- 11) Somers, D.M.: Design and Experimental Results for the S809 Airfoil. NREL/SR-6918. Golden, Colorado, National Renewable Energy Lab., 1997.

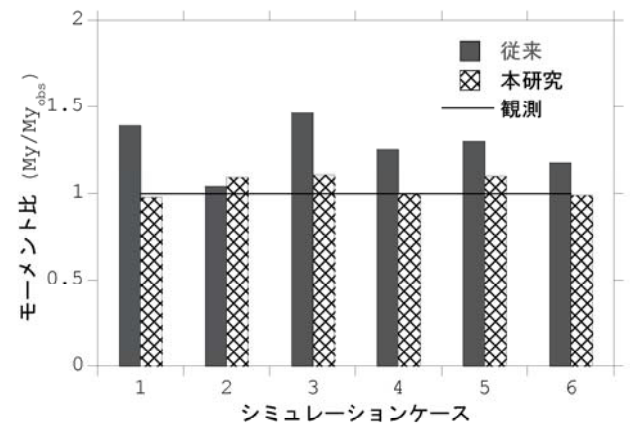


図3 シミュレーションケースによる応答の比較